第 37 卷第 24 期 2017 年 12 月
生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA
Vol.37,No.24 Dec.,2017

DOI: 10.5846/stxb201610282199
霍举颂,刘卫国,刘建国,李宏侠,徐悦,玛丽娅·奴尔兰.影响阜康荒漠-绿洲过渡带荒漠植物数量特征的土壤驱动力分析.生态学报,2017,37(24):8304-8313.
Huo J S, Liu W G, Liu J G, Li H X, Xu Y, Maria · Nurlan.Driving forces of desert plant characteristics in a desert oasis transitional zone in FuKang, Xinjiang, China.Acta Ecologica Sinica,2017,37(24):8304-8313.

影响阜康荒漠-绿洲过渡带荒漠植物数量特征的土壤驱动力分析

霍举颂[1,2],刘卫国[1,2,*],刘建国[1,2],李宏侠[1,2],徐 悦[1,2],玛丽娅·奴尔兰[1,2]
1 新疆大学资源与环境科学学院,乌鲁木齐 830046
2 绿洲生态教育部重点实验室,乌鲁木齐 830046

摘要:荒漠-绿洲过渡带是绿洲向沙漠系统的过渡地带,荒漠植物是绿洲扩展或荒漠化加速的缓冲器,土壤环境是影响植物演变的重要影响因素,土壤环境因素是整个过渡带演化的重要驱动力。通过对阜康荒漠-绿洲过渡带荒漠植物群落实地调查,利用通用植物数量分析软件 CANOCO 5.0 中冗余度分析(RDA),探讨过渡带影响荒漠植物群落数量特征指标的土壤驱动因子。结果表明:(1)土壤含水量、全 N、全 P 和有机质是影响荒漠植物群落数量特征的主要驱动力因子,环境解释量累计达到 69%,而总盐、pH 和全 K 对荒漠植物群落数量特征影响较弱;(2)4 个土壤主要驱动力对荒漠植物群落数量特征重要性大小顺序:土壤含水量>有机质>全 N>全 P;(3)荒漠植物群落数量特征与土壤含水量、有机质和全 P 呈正相关,但与全 N 为负相关关系,揭示了土壤含水量、有机质和全 P 是利于荒漠植物群落稳定的正驱动力,而全 N 为抑制荒漠植物生长的负驱动力。综上所述,土壤各因子的驱动力作用不尽相同,存在正、负差异,协同维护荒漠植物群落数量特征的稳定和发展。

关键词:驱动力;数量特征;荒漠植物;过渡带

Driving forces of desert plant characteristics in a desert oasis transitional zone in FuKang, Xinjiang, China

HUO Jusong[1,2], LIU Weiguo[1,2,*], LIU Jianguo[1,2], LI Hongxia[1,2], Xu Yue[1,2], Maria · Nurlan[1,2]
1 *College of Resourse and Environment Sciences, Xinjiang University, Urumqi* 830046, *China*
2 *Key Laboratory of Oasis Ecology, Urumqi* 830046, *China*

Abstract: The desert-oasis ecotone is a transition zone between oasis and desert. Desert plants are the buffers against oasis expansion or acceleration of desertification. The soil environment is not only an important factor affecting plant evolution, but also it is an important driving force for the evolution of the whole transition zone. In the desert-oasis ecotone of FuKang, a total of 50 plots in three north-south quadrats were selected, and the quantitative characteristics of the desert plants including coverage, abundance, fresh weight and dry weight were measured. Then, we collected soil samples from the different depths of 0—5 cm, 5—10 cm, 10—20 cm, 20—30 cm, and 30—50 cm to analyze its soil moisture content, total salt, pH, total N, total P, total K, and organic matter. Finally, we used redundancy analysis (RDA) to determine the relationships between desert vegetation characteristics and soil environmental factors. By conducting a field investigation of the Gurbantunggut Desert-Oasis ecotone desert plants, this paper tries to discuss the soil factors that drive characteristics of desert plant quantities, using redundancy analysis (RDA) with the application of commonly used plant quantity analysis

基金项目:国家自然科学基金项目(31260112)
收稿日期:2016-10-28; **网络出版日期**:2017-08-15
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: wgliuxj@126.com

software Canoco 5.0. The results show that soil moisture content, total N, total P, and organic matter were the main driving forces which affect the characteristics of desert plant quantities. These environmental factors accounted for up to 69% of the variation, whereas the total salt, pH, total K, and the number of desert plants had smaller effects. The order of importance of the four soil factors that drove plant characteristics is: soil moisture > organic matter > total N > total P. The quantitative characteristics of desert plants were positively correlated with soil water content, organic matter, and total P content, but negatively correlated with total N, which reveals that soil water content, organic matter, and total P are all positive driving forces which are favorable to the stability of desert plant communities, while N is a negative driving force that inhibits desert plant growth. In summary, the soil factors that drive desert plant characteristics do not have the same effects; there are differences between positive and negative effects and synergistic maintenance of desert plant community quantitative characteristics, including stability and development.

Key Words: plant growth drivers; quantitative features; desert plants; ecotone

脆弱的阜康荒漠-绿洲过渡带内生态环境多样而复杂,受人类活动干扰较强,是两个生态系统间频繁进行物质、能量及信息交流的界面区,探究过渡带内荒漠植物群落数量特征及影响因素,在遏制荒漠化、促进植被恢复,维护绿洲稳定具有现实意义[1]。荒漠植物包括旱生或超旱生小乔木、灌木、小灌木,还有旱生或超旱生草本植物等,各种荒漠植物在生长、发育过程中与周围环境密切相关。荒漠植物生长处于温度适中和降水充足的春、夏季节,揭示荒漠植物特别是数量特征与土壤环境间关系,是荒漠-绿洲过渡带生态研究的重点之一。

土壤环境制约荒漠植物生命过程,对植物生长、分布及群落数量特征产生重要影响[2],尤其在降水缺少区域,土壤水分导致植物呈斑块分布,其增加促使荒漠植物叶片鲜重增加,利于形成植物群落“肥岛”[3-4];土壤中盐含量不仅改变荒漠植物种类分布格局,甚至影响荒漠植物叶片大小和质量[5];土壤空间异质性增加,土壤有机质尤其差异明显,则进一步影响植物群落数量特征差异化[6-7];除本研究中涉及土壤因子(土壤含水量、有机质、全 N 和全 P 等)外,荒丘大小[8]、地形、气候及综合自然因素与土壤耦合作用[9]都是影响荒漠植物群落数量特征的重要因素。荒漠植物群落数量特征与土壤因子间关系对荒漠-绿洲过渡带的管理和植被恢复起关键作用,而国内外学者多集中土壤水、盐和有机质等因子对荒漠植物生理响应[4-5,7],较少同时考虑土壤因子对植物群落数量特征的影响[10-13],综合土壤各因子为不同驱动力因素对阜康荒漠-绿洲过渡带荒漠植物群落数量特征的研究鲜有报道。本文以土壤驱动力为切入点,综合土壤多因子作用对荒漠植物的影响,深刻揭示土壤和荒漠植物的复杂关系。

本文以阜康荒漠-绿洲过渡带为研究区,结合约束性排序中冗余分析,探究土壤因素影响荒漠植物群落数量特征的驱动力,以期回答以下问题:(1)影响荒漠植物数量特征的重要土壤驱动力因子有哪些及其重要性如何排序?(2)荒漠-绿洲过渡带不同土层各因子间差异性,如何选择最优土壤层作为后续研究分析?(3)通过冗余分析,怎样定量分析各土壤驱动力因子与荒漠植物群落数量特征的相关关系。为探讨荒漠植物群落分布格局与土壤的关系提供新的思路和理论参考,更好保护荒漠-绿洲过渡带生态环境管理提出合理建议。

1　研究区概况

阜康荒漠-绿洲过渡带南部为三工河流域绿洲平原,北部为古尔班通古特沙漠腹地,降水主要集中于冬春季,普遍不超过 150 mm,荒漠腹地年降水量仅有 70—100 mm,年蒸发量却大于 2000 mm;年均气温在 6—10℃之间,最高气温在 40℃以上,年积温达到 3000—5000℃,空气相对湿度 50%—60%,5—8 月空气相对湿度通常小于 45%[14]。荒漠植物在不同生长环境中时空分布上具有独特性,对过渡带生态系统土地生产力恢复和防止荒漠化具有重要作用。荒漠-绿洲过渡带内土壤类型为灰棕漠土和风沙土,土壤质地轻,养分含量和含水量低,主要优势物种有:雾冰藜(*Bassia dasyphylla* (Fisch. & C. A. Mey.) Kuntze);肉叶雾冰藜(*Bassia sedoides* (Schrad.) Asch);碱蓬(*Suaeda glauca* (Bunge) Bunge in Bull);无叶假木贼(*Anabasis aphylla* Linn.);囊果碱蓬

(*Suaeda physophora* Pall.);多枝柽柳(*Tamarix ramosissima* Lcdcb.);红砂(*Reaumuria songarica* (Pall.) Maxim.);盐爪爪(*Kalidiumfoliatum* (Pall.) Moq.);叉毛蓬(*Petrosimonia* sibirica (Pall.) Bge.)和梭梭(*Chenopodiaceae*),植被类型单调,群落结构简单,以低矮小灌木为主具有旱生性特征。

2 材料与方法

2.1 野外采样

在阜康荒漠-绿洲过渡带上设 3 条南北垂直走向样带, 样带间相隔 2 km,样带每隔 500 m(GPS 定位)设一块样地,每条样带上有 5 块样地,共计 15 块,各样地根据荒漠植物优势种设置 1 个 10 m×10 m 样方,在样地对角线上、中、下部设置 3 个 1 m×1 m 的小样方,共 50 个样方。考虑到荒漠植物生物量丰富期,取样时间为 5 月底 6 月初,进行连续采样,记录每个样方中植物种数、频数、盖度和多度[15]。采用收获法将样方内灌木、小乔木地上部分和全部草本植物收割,用电子天平称取鲜重,然后将样品用布袋或保鲜袋保存带回实验室烘干称取干重。土壤样品采集时间在 5 月 25 号至 6 月 10 号,利用五点法分层采集样方内 0—50 cm 层(0—5、5—10、10—20、20—30 cm、30—50 cm)土壤样品混合后,带回实验室,做进一步分析。

2.2 实验方法

将带回实验室样品采用烘干法,在 105 ℃下持续烘干 24—48 h,测量样品干重,所用天平精度为 0.0001 g。土壤指标测定方法:土壤含水量采用烘干法;pH 值测定采用电位法;利用凯氏定氮法测定全 N 含量,钼锑抗比色法测定全 P 含量;火焰光度计法测定全 K 含量;土壤有机质测定使用重铬酸钾容量法;总盐测定利用水侵法,由离子含量加和计算得出[16]。

2.3 数据处理

实验所得数据应用 SPSS 19.0 软件进行统计分析:计算数据平均值和标准差(SD);利用 Origin 8.0 软件对不同土层土壤各因子解释量变化分析绘图;借助国际标准通用软件 CANOCO 5.0 分析过渡带荒漠植物数量特征和土壤因子相关关系。首先进行去趋势对应分析(DCA),所得排序轴梯度长度(LGA)能够反映过渡带荒漠植物数量特征差异性:梯度长度大于 3 适合线性模型,小于 4 则适合非线性模型,介于 3—4 之间,两种模型都适合[17]。分析显示 4 个排序轴 LGA 最大值 0.636,均小于 3,表明过渡带荒漠植物数量特征与土壤因子有较好线性关系,适宜采用冗余分析(RDA)。

以过渡带荒漠植物多度、盖度、鲜重、干重作为数量指标,土壤含水量、有机质、pH 值、总盐、全 N、全 P、全 K 为土壤影响因子[18],对土壤因子进行 RDA 筛选,同时利用蒙特卡洛置换检验(Monte-Carlo permutation test)定量评价 7 个土壤因子对数量特征变化独立解释量。结果表明 4 个土壤因子的变异膨胀因子(某影响因子与其他因子多重共线性显著时大于 20)小于 10,即这 4 个因子对模型均有一定贡献率,可作为主要土壤因子变量进行分析。

3 结果与分析

3.1 过渡带荒漠植物数量特征及土壤因子统计学分析

分析过渡带荒漠植物数量特征及土壤环境因子,其中对 0—20 cm 层土壤混合进行计算,结果如表 1 所示。荒漠植物鲜重均值为 592.94 g/m^2,最小值仅有 17.07 g/m^2,最大值达 3658.00 g/m^2;干重均值是 206.35 g/m^2,最大值却仅有 832.00 g/m^2,鲜重与干重差值可以估计荒漠植物含水量,表明荒漠-绿洲过渡带内水是关键驱动力;盖度均值为 25%,最小值仅为 4%,相对较低;多度均值为 4.96,最小值是 2,植物不同样方之间差异明显。进一步分析土壤因子表明:土壤含水量较低,均值为 2.90 g/kg;研究区土壤偏碱性,pH 均值是 8.25,最大值高达 9.54;盐渍化程度较高,计算可得总盐均值为 11.52 g/kg,极差可达 32.54 g/kg;作为衡量土壤生产力指标,有机质均值为 10.16 g/kg,最小值仅有 2.51 g/kg,揭示土壤生产力有所差异;其他指标全 N、全 P、全 K 的均值分别是 0.61、0.90、20.36 g/kg。变异系数(CV)是描述变量空间变异程度的主要指标,过渡带荒漠植物

数量特征和土壤因子变异系数均在 1.0 以下,表明不同样方内土壤空间异质性差异较弱,符合数据分析前提条件。

表 1　过渡带荒漠植物数量特征及土壤环境因子的统计学参数

Table 1　The quantitative characteristics of desert plants and environmental factor

变量指标 Indicator	最小值 Min.	最大值 Max.	均值 Mean	标准差 SD	偏度 SKewness	峰度 Kurtosis	变异系数 CV
鲜重 Fresh weight/(g/m^2)	17.07	3658	592.94	573.93	3.52	16.53	0.97
干重 Dry weight /(g/m^2)	18	832	206.35	144.23	2.05	6.37	0.7
盖度 Coverage/%	4	85	25	22	1.26	0.81	0.86
多度 Multi degree	2.00	10	4.96	1.72	0.57	0.62	0.35
土壤含水量 The soil moisture/(g/kg) content	0.49	6.91	2.9	1.26	0.57	1.17	0.44
总盐 The total salt/(g/kg)	0.35	32.83	11.52	8.67	0.56	0.42	0.75
pH	6.92	9.54	8.25	0.53	0.14	1.65	0.07
全 NThe total N/(g/kg)	0.21	1.65	0.61	0.31	1.51	2.78	0.51
全 PThe total N/(g/kg)	0.32	1.41	0.9	0.19	-0.52	2.42	0.21
全 KThe total N/(g/kg)	15.41	23.18	20.36	1.5	-1.04	2.68	0.07
有机质 The organic matter/(g/kg)	2.51	26.41	10.16	6.11	1.26	1.18	0.6

3.2　不同土层土壤各因子解释量变化

通过分析不同土层各因子解释量变化(图 1)发现:0—50 cm 土层中土壤含水量在土壤因子占比中最高,均不小于 37%,在 20 cm 土层达到最大值 58.1%,30 cm 和 50 cm 土层没有差异,说明 20 cm 土壤含水量是影响过渡带荒漠植物数量特征关键驱动力;其他土壤因子变化和土壤含水量变化趋势相同。全 N 在 0—10 cm 土层中变化比较小,但是在 20 cm 达到最大值,有机质和全 N 呈相反增加趋势,对荒漠植物限制作用明显增强,说明全 N 是重要负驱动力;全 P 主要集中在 5 cm 以下土层中,在各土层中所占比重差异较明显,但是总量在土层中占比很小,说明全 P 对荒漠植物数量特征影响很小。

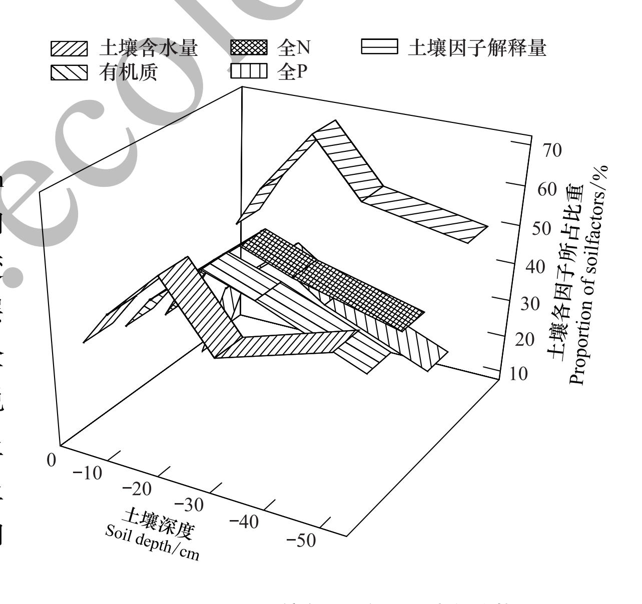


图 1　不同土层土壤各因子解释量变化趋势图

Fig.1　The variation trend of soil factors in different soil layers

从不同土层各因子变化曲线中看出:0—50 cm 土层中土壤含水量、有机质、全 N 和全 P 对过渡带荒漠植物数量特征解释量占比呈现先短暂上升后持续下降现象;30 cm 以下土壤含水量却略有升高,其他因子连续下降;各土壤因子 5—10 cm 土层缓慢上升,全 N 在 10—20 cm 土层明显上升,即全 N 含量对荒漠植物影响明显增强。综合各因子解释量和变化曲线,揭示了土壤因子与荒漠数量特征之间联系在 20 cm 土层中较紧密。

3.3　过渡带荒漠植物数量特征与土壤驱动力因子的典范分析

3.3.1　荒漠数量特征和土壤驱动力因子进行 RDA 排序

对过渡带荒漠植物数量特征和经过变异膨胀因子筛选后 4 个土壤因子进行 RDA 分析,解释了 4 个土壤因子对荒漠植物数量特征影响(表 2)。荒漠植物数量特征在第Ⅰ轴、第Ⅱ轴解释量分别为 61.13% 和6.18%,荒漠植物数量特征累计解释信息量为 69%,对荒漠植物数量特征与土壤因子关系累计解释量达 98.71%,由此可知前两轴能够很好地反映过渡带荒漠植物数量特征变异和土壤因子的关系,且主要是由前两轴决定。

表 2 荒漠植物数量特征变化的解释变量冗余分析

Table 2 The redundancy analysis of the explanatory variables in the change of plant quantity

排序轴 Axis	第Ⅰ轴 Axis Ⅰ	第Ⅱ轴 Axis Ⅱ	第Ⅲ轴 Axis Ⅲ	第Ⅳ轴 Axis Ⅳ
数量特征解释量 Variance explains of quantitative characteristics/%	0.6113	0.0618	0.0085	0.0077
数量特征与环境因子相关性 Correlations between ecological factors and quantitative characteristics	0.9529	0.4684	0.4357	0.2131
数量特征累计解释量 Cumulative percentage variance of quantitative characteristics	61.13	67.31	68.16	68.93
数量特征-环境因子关系累计解释 Cumulative percentage variance of relation between ecological factors and quantitative characteristics	89.36	98.71	99.8	100
典范特征值 Sum of all canonical eigenvalues	69.16%			
总特征值 Sum of all eigenvalues	1.00			

土壤因子与每个排序轴相关系数见表 3。7 个土壤因子中,土壤含水量与第Ⅰ轴相关系数最大,达 0.9309,且两者呈正相关关系,说明土壤含水量是关键驱动力;全 N 与第Ⅱ轴的相关系数最大,为-0.204,呈现负相关性,反映了全 N 是逆向驱动力;全 P 与第Ⅲ轴的相关系数最大,分别为 0.1602,相关性明显低于前两轴,说明全 P 对数量特征影响较弱,可作为重要驱动力;第Ⅳ轴反映主要影响因素是全 K,但是对荒漠植物数量特征影响不显著。

表 3 土壤因子与排序轴的相关关系

Table 3 Relationship between environmental factors and ordination axes

土壤因子 Soil factors	第Ⅰ轴 Axis Ⅰ	第Ⅱ轴 Axis Ⅱ	第Ⅲ轴 Axis Ⅲ	第Ⅳ轴 Axis Ⅳ
土壤含水量 The soil moisture	0.9309	0.0179	0.0376	-0.0173
总盐 The total salt	0.3359	0.1294	0.1584	-0.0061
pH	-0.4341	-0.0993	-0.1096	0.043
全 N The total N	-0.8938	-0.204	0.0694	-0.0472
全 P The total P	-0.807	0.0204	0.1602	-0.0327
全 K The total K	-0.2546	0.0414	-0.0439	0.096
有机质 The organic matter	0.9008	0.0097	0.0221	-0.0802

进一步得到过渡带荒漠植物数量特征指标与土壤因子二维排序图(图 2)。由排序图知,荒漠植物数量特征指标用实心箭头连线表示,土壤因子用带空心箭头连线表示;箭头长短表示荒漠植物数量特征与土壤因子关系大小,箭头连线越长相关性越大,反之,则越小;箭头与排序轴夹角表示相关性大小,夹角越小,相关性越大。从图 2 中可以看出,土壤含水量与有机质箭头连线最长,可知二者是影响过渡带荒漠植物数量特征的重要驱动力,以及全 P 3 个因子与数量特征呈正相关,全 N 却与之负相关;其中有机质和干重相关性最大,土壤含水量和多度相关性最大,说明过渡带荒漠植物不同数量特征受不同土壤因子影响差异明显,但主要土壤因子均与荒漠植物生物量呈极显著相关性;全 K 和 pH 成正比,总盐与其他因子没有相关性,说明 3 个因子与荒漠植物数量特征无关。

综合上述分析,影响过渡带荒漠植物数量特征的驱动力因子重要性存在差异。对 7 个土壤因子进行蒙特卡洛检验,得到土壤变量重要性排序,结果如表 4 所示:土壤驱动力因子重要性影响由大到小依次为土壤含水量>有机质>全 N>全 P,四个因子对数量特征影响极显著($P<0.01$),其中全 N 和数量特征呈反比;4 个驱动力因子占所有土壤因子解释量比例分别为 58.1%、52.9%、52.4%和 42.6%,其中土壤含水量是影响荒漠植物数量特征关键驱动力;7 个土壤因子中 4 个显著水平,其他 3 个土壤因子对荒漠植物数量特征影响较小。

3.3.2　单一驱动力因子对荒漠植物数量特征影响

逐一分析研究中与过渡带荒漠植物数量特征有极显著影响关系土壤各因子,进一步确定单一因子对数量特征的影响,分析采用包含数量特征箭头连线和土壤因子箭头及虚实圆圈的 t-value 双序图。t-value 双序图可解释荒漠植物数量特征对土壤因子依赖程度,如果某数量特征箭头连线完全落入实线圆圈中,代表该数量特征与这一土壤因子呈正相关,反之如果某数量特征箭头连线完全在虚线圆圈中,代表该数量特征与其负相关。

逐一对土壤因子与过渡带数量特征关系进行分析(图3),土壤含水量与鲜重关系最显著,其他 3 个数量特征也有重要相关性;有机质是影响干重变化主要驱动力,与鲜重相关性不显著,与盖度和多度有相关性;以上两个土壤因子均与荒漠植物多度和盖度正相关,但是分别对鲜重和干重产生影响。反映了全 N 与数量特征负相关关系,其中与鲜重呈现显著负相关性,说明研究区内全 N 是影响荒漠植物生长逆向驱动力因素;反映了全 P 与植物干重正相关,与其他数量特征没有相关性。通过以上分析说明 4 个数量特征指标与土壤因子有相关性,土壤含水量和全 N 分别与数量特征正、负相关,这两个因子显著影响荒漠植物生长发育及形态建成,是影响过渡带数量特征差异的重要驱动力。

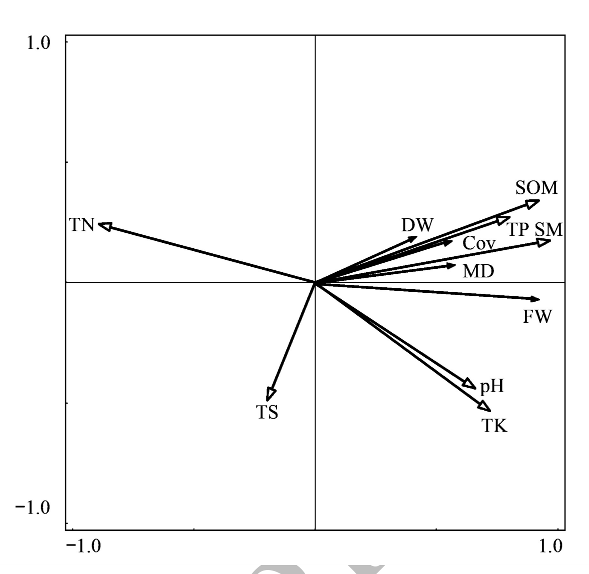


图 2　荒漠植物数量特征与土壤因子关系的冗余分析排序图

Fig. 2　The relationship between desert plant quantitative characters and environmental factors in RDA

土壤含水量 Soil moisture content;土壤含水量 Total N;全 P Total P;土壤有机质 Soil organic matter;土壤有机质 Total K;总盐 Total salt;鲜重 Fresh weigh;干重 Dry weight;盖度 Coverage;多度 Multi degree

表 4　土壤变量解释的重要性排序和显著性检验结果

Table 4　The importance of environmental variables to explain the order and significance of the test results

土壤因子 Soil indicators	重要性排序 Importance ranK	土壤因子所占解释量/% Variance explains of environment indicators	F	P
土壤含水量 The soil moisture	1	58.1	66.4	0.002
有机质 The organic matter	2	52.9	54	0.002
全 N The total N	3	52.4	52.8	0.002
全 P The total P	4	42.6	35.6	0.002
pH	5	9.8	5.3	0.012
全 K The total K	6	2.9	4.1	0.028
总盐 The total salt	7	0.3	0.2	0.68

4　讨论

阜康荒漠-绿洲过渡带,荒漠植物覆盖度相对较低,平均只有 25%,且鲜重与干重差异巨大,这是荒漠植物适应干旱环境的结果,与其特殊水文、土壤环境条件密切相关。过渡带内土壤水、盐环境:土壤含水量低,均值仅为 2.90 g/kg;土壤盐分含量高达 11.52 g/kg,超过重度盐渍土标准。不同土层土壤各因子解释量变化规律,表明荒漠植物数量特征的关键驱动力是土壤含水量,特别是受 20 cm 层土壤含水量影响。

4.1　土壤含水量是影响过渡带荒漠植物关键驱动力

研究区内土壤中水分自然补给主要来源是冬季融雪和春季降水,具有强烈时空异质性和随机性特征,是荒漠-绿洲过渡带生态系统中荒漠植物水分利用最重要部分形式[19-20],导致荒漠植物群落分布时空差异[21]。

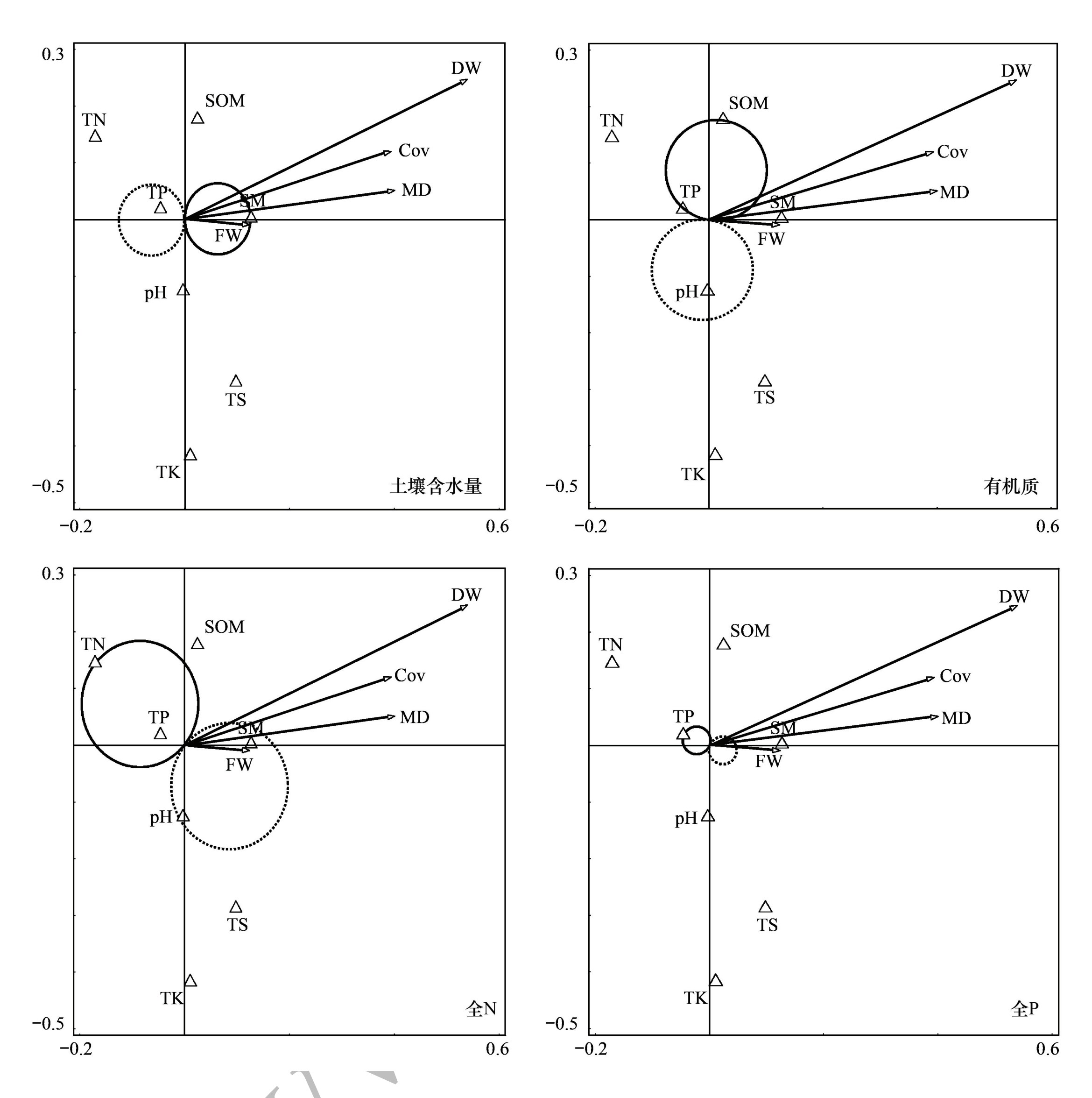


图 3 单一环境因子与过渡带数量特征影响的检验结果

Fig.3 The test results of single environmental factor and quantitative characteristics

朱瑞清等[22]发现荒漠植物水分消耗量与其盖度呈显著负相关,得到土壤含水量与荒漠植物盖度呈正相关性,本文与其结果相一致。但荒漠-绿洲过渡带鲜有涉及土壤含水量对荒漠植物群落不同数量特征的关系,需要进一步深入验证。

土壤因子分布变化是影响荒漠植物群落数量特征的重要驱动力,土壤含水量作为关键驱动力,影响土壤孔隙度和土壤微生物生理响应过程,改变荒漠植物生长环境,进而导致荒漠植物空间分布和群落数量特征呈多元化。降水引起浅层土壤含水量增加,同时过渡带内土壤以沙壤土为主,土壤含水量集中分布在 20 cm 层以上,RDA 分析表明土壤含水量与植物盖度和鲜重呈极显著正相关,是影响荒漠植物群落数量特征的第一驱动力因素,这与 Hao 等对塔里木盆地北缘荒漠植物与水分关系研究的结论相同[23]。此外,与李巧梅等对古尔班通古特荒漠短命植物研究结果趋于一致[24]。本结果揭示土壤水含量特别是表层(0—20 cm)土壤水对荒漠植物群落数量特征起到非常重要的生态作用。

4.2 土壤有机质对过渡带荒漠植物的影响

土壤有机质对荒漠植物影响主要表现在土层 0—20 cm 中,荒漠植物干重和盖度与有机质含量呈正相关。荒漠-绿洲过渡带草本植物主要是短命或类短命植物,生长季节处于春、夏季,荒漠植物生长需要土壤有机质

补充,而本研究内土壤有机质含量均值仅为 10.16 g/kg,明显低于全国水平 32.3 g/kg[25],则造成"消耗多,补充少"的营养循环。却高于单一荒漠植物土壤中有机质含量(0.8—2.5 g/kg)[26],可能是绿洲向荒漠过渡地带,草本植物枯枝落叶是土壤有机质主要来源[27],有机质来源相对较多,且植物处于生长季节,土壤动物、微生物活动强烈,促进凋落物分解。因此,即便过渡带内有机质含量低,但可足够满足荒漠植物生长需求,导致干重质量增加。

荒漠土壤有机质含量在土壤中占比很小,且土壤质地对有机质含量影响较大,沙壤土比风沙土中土壤有机质含量高[25]。冯雷等对古尔班通古特沙漠土壤属性空间分布研究,发现有机质含量从西北向东南和沙漠南、北两侧向沙漠腹地递减[28],研究区位于古尔班通古特沙漠南缘过渡地带,受人为活动影响显著,有机质含量比其他荒漠区高。张宁等指出土壤碳酸钙与土壤有机质之间存在关联性[29],荒漠-绿洲过渡带沙丘固定后,在成土碳酸钙作用下,各种植物残体分解形成土壤有机质,沙壤土当水分充足情况下,加快土壤中有机质分解,为荒漠植物生长提供充足养分,与本文土壤有机质与荒漠植物生物量正相关结果相同。土壤有机质对荒漠植物产生重要影响,当土壤水分充足的条件下,有机质成为荒漠植物的关键驱动力。

4.3　土壤全 N 是影响过渡带荒漠植物的负驱动力

在干旱、半干旱区,土壤氮含量是荒漠植物生长主要限制因子之一[30-31]。Treseder 指出土壤呼吸在 N 施肥背景下平均下降 15%[32],指出荒漠生态系统全氮含量增加,而导致土壤生物活性降低,过渡带中土壤全 N 含量与荒漠植物群落数量特征呈负相关与其结果相一致。多种类型土壤中全 N 含量在降雨期间明显增加[33-34],如内盖夫沙漠春季短暂激烈降雨后微生物活动促进全 N 含量增加[35]。研究区内春季降水较少,土壤有机质无法有效形成积累,与此同时氮素是有机质的重要组成部分,土壤中全氮含量不能满足荒漠植物生长需求,而抑制荒漠植物对营养的吸收,进一步证实全 N 是荒漠植物重要负驱动力。Thorup-Kristensen 揭示秋季覆盖物中微生物活动和土壤 N 淋溶作用强烈导致土壤中氮素含量呈下降趋势[36],与过渡带内有效降水和凋落覆盖物缺少,土壤微生物对氮吸收不足的结果存在差异。Berg 等指出在沙漠生态系统中,氮是植物生长最常见的限制元素,且与气候变化密切相关[30],表明不同土壤类型中氮含量存在一定差异。

可溶性蛋白在植物体内以氮素形式保存,干旱显著增加荒漠植物可溶性蛋白含量[35],致使相应保护系统得到加强[37],从而促进植物 N 含量升高,高 N 含量使植物体内细胞液浓度增大,提高叶片水势,促进水分吸收,缓解干旱胁迫[38]。研究表明土壤全 N 含量与植物干重和鲜重有显著负相关关系,指出过渡带内荒漠植物在受到干旱胁迫时,以提高自身生理指标进行抵御干旱,可能是土壤含水量满足荒漠植物生长需求情况下,全 N 成为负驱动因子,最终导致植物生物量比其他地区较低。

4.4　土壤全 P 对荒漠植物的影响

荒漠-绿洲过渡带土壤呈弱碱性,全磷平均值达到 0.9 g/kg,明显高于流动沙丘,与席军强等[39]对民勤荒漠-绿洲偏碱性沙丘土壤,全 P 含量随着沙丘固定显著增加的结果相一致。土壤磷参与氧化/硝化反应机制,发挥着重要的活性炭作用,pH 值增加可提高生物利用土壤磷[40],研究区土壤 pH 均值达到 8.25,促进了荒漠植物对磷的吸收,与土壤含水量和有机质含量增加协同作用下,可促进生物量增长,冗余分析揭示了土壤含水量、有机质和全 P 是荒漠植物重要的驱动力。土壤全 P 与植物鲜重和干重呈正相关,与其盖度没有明显关系;这与有关学者对土壤磷含量研究存在差异:植物 P 含量在各生长阶段具有较大差异,旱生草本[18,41]和湿生草本[42],土壤 P 含量均随着植物生长而降低。荒漠草本植物对土壤全 P 利用过程中,所在环境土壤含水量、有机质和其他陆地生态系统存在巨大差异,过渡带内草本植物都长期处于干旱环境下,形成与其他地区草本植物不同的干旱胁迫机制。有研究表明,根际对土壤全 P 含量影响很小[43],这与在弱碱性土壤全 P 含量有所增加的结果相反,可能与选择样地的生境均质性有关。过渡带内有机质较低,对土壤磷需求较少,土壤 pH 呈弱碱性,但是土壤全 P 与植物生物量正相关,说明荒漠植物能够有效吸收土壤全 P,这与土壤缺磷条件下促使植物根系分泌 H^+、柠檬酸等物质,这些物质可在低磷土壤中释放磷酸铁中的磷,供植物吸收[44]的研究有所差异,其中荒漠植物对全 P 的吸收机制仍有待进一步深入研究。土壤全 P 对荒漠植物演变产生一定影响,仍

作为土壤环境不可忽视的一部分,冗余分析结果表明全 P 是影响荒漠植物的弱驱动力因子。

5 结论

综上所述,通过对荒漠植物的土壤驱动力分析得出以下结论:

(1)土壤含水量、全 N、全 P 和有机质是荒漠植物群落数量特征评价的重要土壤驱动力,4 个土壤驱动因子的重要性排序是:土壤含水量>有机质>全 N>全 P。

(2)土壤含水量与鲜重呈显著正相关,有机质和全 P 与干重正相关,3 个因子与盖度和多度都有正相关性,是荒漠植物生长主要正驱动因子,全 N 与荒漠植物群落数量特征都呈负相关,是影响荒漠植物生长的负驱动因子。

(3)不同土层之间各个土壤因子的环境解释量有所差异,0—20 cm 表层土壤中土壤因子与荒漠植物群落数量特征相关性最大,呈现出随着深度增加两者相关性先增加后减弱趋势,与累计环境解释量趋势一致。

参考文献(References):

[1] Zhang R, Liu T, Zhang J L, Sun Q M. Spatial and environmental determinants of plant species diversity in a temperate desert. Journal of Plant Ecology, 2016, 9(2): 124-131.

[2] Johnson B G, Verburg P S J, Arnone III J A. Plant species effects on soil nutrients and chemistry in arid ecological zones. Oecologia, 2016, 182(1): 299-317.

[3] Schlesinger W H, Reynolds J F, Cunningham G L, Huenneke L F, Jarrell W M, Virginia R A, Whitford W G. Biological feedbacks in global desertification. Science, 1990, 47(4946): 1043-1048.

[4] 曾晓玲, 刘彤, 张卫宾, 孙钦明, 沈雪莹, 司朗明. 古尔班通古特沙漠西部地下水位和水质变化对植被的影响. 生态学报, 2012, 32(5): 1490-1501.

[5] An P, Li X J, Zheng Y R, Eneji A E, Qiman Y, Zheng M Q, Inanaga S. Distribution of plant species and species-soil relationship in the east central Gurbantunggut Desert, China. Journal of Geographical Sciences, 2015, 25(1): 101-112.

[6] Li C J, Lei J Q, Shi X, Liu R. Scale dependence of soil spatial variation in a temperate desert. Pedosphere, 2014, 24(3): 417-426.

[7] 张雪妮, 吕光辉, 王庭权, 马玉, 阿布里孜·阿不都热合曼, 赵晓英, 郭振洁, 朱修逸. 荒漠区垂直河岸带植物多样性格局及其成因. 生态学报, 2015, 35(18): 5966-5974.

[8] 刘忠权, 刘彤, 张荣, 陈辉煌. 古尔班通古特沙漠南部短命植物群落物种多样性及空间分异. 生态学杂志, 2011, 30(1): 45-52.

[9] Dai L, Feng Y X, Luo G P, Li Y Z, Xu W Q. The relationship between soil, climate and forest development in the mid-mountain zone of the Sangong River watershed in the northern Tianshan Mountains, China. Journal of Arid Land, 2015, 7(1): 63-72.

[10] Ma J, Li L H, Guo L P, Bai L, Zhang J R, Chen Z H, Ahmad S. Variation in soil nutrients in grasslands along the Kunes River in Xinjiang, China. Chemistry and Ecology, 2015, 31(2): 111-122.

[11] Zhang P P, Shao M A, Zhang X C. Scale-dependence of temporal stability of surface-soil moisture in a desert area in northwestern China. Journal of Hydrology, 2015, 527: 1034-1044.

[12] 刘虎俊, 刘世增, 李毅,杨自辉, 李银科, 张莹花, 郭春秀, 刘淑娟. 石羊河中下游河岸带植被对地下水位变化的响应. 干旱区研究, 2012, 29(2): 335-341.

[13] 毛伟, 李玉霖, 孙殿超, 王少昆. 养分和水分添加后沙质草地不同功能群植物地上生物量变化对群落生产力的影响. 中国沙漠, 2016, 36(1): 27-33.

[14] 张立运, 陈昌笃. 论古尔班通古特沙漠植物多样性的一般特点. 生态学报, 2002, 22(11): 1923-1932.

[15] Xi H Y, Qi F L, Zhang J H, Si Z Q, Chang, Yu T F, Guo R. Effects of water and salinity on plant species composition and community succession in Ejina Desert Oasis, northwest China. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(2): 138.

[16] 张荣, 刘彤. 古尔班通古特沙漠南部植物多样性及群落分类. 生态学报, 2012, 32(19): 6056-6066.

[17] 王凯博, 上官周平. 黄土丘陵区燕沟流域典型植物叶片 C、N、P 化学计量特征季节变化. 生态学报, 2010, 31(17): 4985-4991.

[18] Niu R X, Liu J L, Zhao X Y, Qin Y. Ecological benefit of different revegetated covers in the middle of Hexi corridor, northwestern China. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(7): 5699-5710.

[19] Huang T M, Pang Z H, Chen Y N, Kong Y L. Groundwater circulation relative to water quality and vegetation in an arid transitional zone linking oasis, desert and river. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(25): 3088-3097.

[20] Kammer P M, Schöb C, Eberhard G, Gallina R, Meyer R, Tschanz C. The relationship between soil water storage capacity and plant species diversity in high alpine vegetation. Plant Ecology & Diversity, 2013, 6(3/4): 457-466.

[21] Zhang Z Y, Wan C Y, Zheng Z W, Hu L, Feng K, Chang J B, Xie P. Plant community characteristics and their responses to environmental factors in the water level fluctuation zone of the three gorges reservoir in China. Environmental Science and Pollution Research, 2013, 20(10): 7080-7091.

[22] 朱瑞清, 张志山, 刘立超, 回嵘, 张浩, 鲍婧婷. 干旱沙漠边缘地带 7 种沙生植物适应性机理. 生态学杂志, 2015, 34(10): 2749-2756.

[23] Hao X M, Li W H, Huang X, Zhu C G, Ma J X. Assessment of the groundwater threshold of desert riparian forest vegetation along the middle and lower reaches of the Tarim River, China. Hydrological Processes, 2010, 24(2): 178-186.

[24] 李巧梅, 曾勇, 孙钦明, 刘彤, 韩志全, 李勇冠, 刘华峰. 决定古尔班通古特沙漠短命植物分布的关键因子是 5 月降水. 生态学杂志, 2014, 33(8): 2038-2045.

[25] Li X R, Jia X H, Dong G R. Influence of desertification on vegetation pattern variations in the cold Semi-arid grasslands of Qinghai-Tibet Plateau, North-west China. Journal of Arid Environments, 2006, 64(3): 505-522.

[26] 戴万宏, 黄耀, 武丽, 俞佳. 中国地带性土壤有机质含量与酸碱度的关系. 土壤学报, 2009, 46(5): 851-860.

[27] 郭京衡, 李尝君, 曾凡江, 张波, 刘波, 郭自春. 2 种荒漠植物根系生物量分布与土壤水分、养分的关系. 干旱区研究, 2016, 33(1): 166-171.

[28] 冯雷, 刘彤, 孙钦明, 刘华锋, 郝晓冉, 赵丹. 古尔班通古特沙漠南部土壤属性空间分布特征. 石河子大学学报: 自然科学版, 2015, 33(3): 287-293.

[29] 张宁, 何兴东, 邬畏. 腾格里沙漠 3 种土壤有机质和碳酸钙特征. 生态学报, 2009, 29(8): 4094-4101.

[30] Berg W A, Bradford J A, Sims P L. Long-term soil nitrogen and vegetation change on sandhill rangeland. Journal of Range Management, 1997, 50(5): 482-486.

[31] 王蒙, 董治宝, 罗万银, 逯军峰, 李继彦, 崔徐甲, 张玉. 巴丹吉林沙漠南缘植被物种多样性及其与土壤特性的关系. 西北植物学报, 2015, 35(2): 379-388.

[32] Treseder K K. A meta-analysis of mycorrhizal responses to nitrogen, phosphorus, and atmospheric CO_2 in field studies. New Phytologist, 2004, 164(2): 347-355.

[33] Peterjohn W T, Schlesinger W H. Factors controlling denitrification in a Chihuahuan desert ecosystem. Soil Science Society of America Journal, 1991, 55(6): 1694-1701.

[34] Zaady E, Groffman P M, Shachak M. Litter as a regulator of N and C dynamics in macrophytic patches in Negev desert soils. Soil Biology and Biochemistry, 1996, 28(1): 39-46.

[35] Zaady E. Seasonal change and nitrogen cycling in a patchy Negev desert: a review. Arid Land Research and Management, 2005, 19(2): 111-124.

[36] Thorup-Kristensen K, Magid J, Jensen L S. Catch crops and green manures as biological tools in nitrogen management in temperate zones. Advances in Agronomy, 2003, 79: 227-302.

[37] 周晓兵, 张元明, 王莎莎, 张丙昌, 张静. 3 种荒漠植物幼苗生长和光合生理对氮增加的响应. 中国沙漠, 2011, 31(1): 82-89.

[38] Cui Y Q, Ma J Y, Sun W, Sun J H, Duan Z H. A preliminary study of water use strategy of desert plants in Dunhuang, China. Journal of Arid Land, 2015, 7(1): 73-81.

[39] 席军强, 杨自辉, 郭树江, 王强强, 张剑挥, 王多泽. 不同类型白刺沙丘土壤理化性状与微生物相关性研究. 草业学报, 2015, 24(6): 64-74.

[40] Zhou X B, Zhang Y M, Ji X H, Downing A, Serpe M. Combined effects of nitrogen deposition and water stress on growth and physiological responses of two annual desert plants in northwestern China. Environmental and Experimental Botany, 2011, 74: 1-8.

[41] WarnocK D D, Lehmann J, Kuyper T W, Rillig M C. Mycorrhizal responses to Biochar in soil-concepts and mechanisms. Plant and Soil, 2007, 300(1/2): 9-20.

[42] 吴统贵, 吴明, 刘丽, 萧江华. 杭州湾滨海湿地 3 种草本植物叶片 N、P 化学计量学的季节变化. 植物生态学报, 2010, 34(1): 23-28.

[43] 李从娟, 李彦, 马健. 古尔班通古特沙漠土壤化学性质空间异质性的尺度特征. 土壤学报, 2011, 48(2): 302-310.

[44] Chai H, Yu G R, He N P, Wen D, Li J, Fang J P. Vertical distribution of soil carbon, nitrogen, and phosphorus in typical Chinese terrestrial ecosystems. Chinese Geographical Science, 2015, 25(5): 549-560.